

**А.Б. Бирюков /д.т.н./, В.А. Семергей**  
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫГОРАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ТОПКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА

*Предложена математическая модель выгорания полифракционного пылеугольного топлива в топке энергетического котла. Она базируется на рассмотрении системы обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, описывающих изменение размера частиц каждой из выделенных для рассмотрения фракций. При этом парциальное давление кислорода в каждый момент времени определяется на основании рассмотрения одновременного выгорания частиц всех фракций. При проведении численных экспериментов для типовых условий эксплуатации котла ТП-100, сжигающего антрацитовую пыль, показана достаточная для предварительного рассмотрения степень соответствия расчетных и практических данных о доле несгоревшего углерода и величине механического недожога. Доказано, что результат определения доли несгоревшего углерода существенно зависит от количества выделенных для рассмотрения фракций пыли. Также на основании анализа расчетных данных об изменении доли несгоревшего углерода и скорости выгорания углерода сделан вывод о целесообразности предварительной тепловой обработки пыли для уменьшения времени задержки воспламенения частиц в топке котла.*

**Ключевые слова:** угольная пыль, энергетический котел, сжигание пылеугольного топлива, си-  
 товый анализ, доля несгоревшего углерода, механический недожог.

### Постановка проблемы

Несмотря на успехи, достигнутые за последние десятилетия в области нетрадиционной энергетики, и довольно высокую долю атомной энергетики в мировой структуре выработки электроэнергии, теплоэнергетика в настоящее время и на ближайшую перспективу продолжает играть очень важную роль.

Традиционно основным источником энергии на теплоэлектростанциях является твердое топливо, а основной способ сжигания – факельное сжигание в топках энергетических котлов. Одной из статей потерь энергии при сжигании твердого топлива являются потери с механическим недожогом, связанные с тем, что не весь углерод коксового остатка частиц угольной пыли успевает полностью выгореть за время их пребывания в топочном пространстве. В настоящее время в среднем потери энергии с мехнедожогом при сжигании антрацитов и тощих углей в пылевидном состоянии составляют 1-6 %, и поэтому задача их сокращения продолжает быть актуальной.

### Анализ последних исследований и публикаций

На практике для решения задачи сокращения механического недожога используются следующие технические решения: применение вихре-

вых горелок и совершенствование их параметров, повышение реакционной способности топлива за счет предварительной тепловой обработки (например, при помощи плазматронов или других способов), увеличение тонины помола и т.д. [1].

Очевидно, что для достижения наилучших результатов технологические и конструктивные параметры должны в первом приближении корректироваться только на основании результатов предварительной расчетной проработки. Для рассмотрения такой сложной задачи, как выгорание факела твердого топлива при его сжигании в факеле, наиболее предпочтительным является использование метода математического моделирования.

Особой популярностью в настоящее время пользуются модели, создаваемые в специализированных вычислительных пакетах типа ANSYS. Имеется ряд готовых демонстрационных проектов, описывающих горение частиц пыли в топочном пространстве энергетических котлов [1,2]. Данные модели рассматривают одновременное протекание множества процессов (что, с одной стороны, хорошо), но это вызывает проблемы их адаптации и подтверждения адекватности.

Эти модели играют значительную роль в гносеологическом плане и могут быть нацелены

на поиск принципиально новых решений, однако для условий технических отделов теплоэлектростанций важно иметь инструмент в виде упрощенных быстродействующих, безусловно, устойчивых прогнозных математических моделей, позволяющих оперативно проверить влияние конструктивных и технологических параметров на качество выгорания топлива.

Достаточно простая модель выгорания угольной частицы в виде дифференциального уравнения 1-го порядка предложена в работе [3]. Для учета полифракционности факела в этой же работе получены упрощенные интегральные соотношения. Однако их недостатком является необходимость выбора и подстановки в расчетные выражения средних значений величин, характеризующих процесс, что может приводить к снижению точности расчетов.

**Цель (задачи) исследования**

Целью данной работы является создание математической модели выгорания полифракционного факела, позволяющей одновременно учесть особенности выгорания каждой из фракций угольной пыли.

**Основной материал исследования**

Для решения поставленной цели математическая модель должна быть представлена *n*-ным количеством обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, где *n* – количество выделенных для рассмотрения фракций. Тогда разрабатываемая математическая модель запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\delta_1}{d\tau} &= \frac{P}{RT} 0,21 \frac{2M_C}{\rho_e} \frac{V_e^0}{V_a} \times \\ &\times \frac{k_1}{1 + \left(\frac{1}{Nu_{D1}}\right) \frac{k_1 \cdot \delta_1}{D_1}} \left[ (\alpha - 1) \frac{V^0}{V_e^0} + G \right] \\ &\vdots \\ \frac{d\delta_i}{d\tau} &= \frac{P}{RT} 0,21 \frac{2M_C}{\rho_e} \frac{V_e^0}{V_a} \times \\ &\times \frac{k_i}{1 + \left(\frac{1}{Nu_{Di}}\right) \frac{k_i \cdot \delta_i}{D_i}} \left[ (\alpha - 1) \frac{V^0}{V_e^0} + G \right] \\ &\vdots \\ \frac{d\delta_n}{d\tau} &= \frac{P}{RT} 0,21 \frac{2M_C}{\rho_e} \frac{V_e^0}{V_a} \times \\ &\times \frac{k_n}{1 + \left(\frac{1}{Nu_{Dn}}\right) \frac{k_n \cdot \delta_n}{D_n}} \left[ (\alpha - 1) \frac{V^0}{V_e^0} + G \right], \end{aligned}$$

где *P* – давление в топочной камере, Па; *R* – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); *T* – текущее значение температуры поверхности частицы, К;  $\rho_k$  – кажущаяся плотность угольной частицы без учета золы и летучих, кг/м<sup>3</sup>; *M<sub>C</sub>* – молярная масса углерода, кг/кмоль; *V<sup>0</sup>* – объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг угля, м<sup>3</sup>/кг; *V<sub>z</sub>* – объем продуктов сгорания, образующихся при сгорании 1кг угля, м<sup>3</sup>/кг; *V<sub>k</sub><sup>0</sup>* – объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг углерода (8,89 м<sup>3</sup>/кг); *k* – константа скорости реакции окисления углерода, взятая при соответствующем значении температуры поверхности частицы топлива, м/с; *Nu<sub>D</sub>* – диффузионное число Нуссельта; *D* – коэффициент диффузии кислорода в газообразной среде, окружающей частицу, м<sup>2</sup>/с; *G* – текущая доля несгоревшего углерода коксового остатка.

Время пребывания частиц в топочном пространстве определено при помощи следующего выражения [3]:

$$\tau = \frac{V_m}{B \cdot V_z} \frac{273}{T_\phi},$$

где *V<sub>m</sub>* – объем топки котла, м<sup>3</sup>; *B* – расход топлива на котел, кг/с; *T<sub>φ</sub>* – средняя температура факела, К.

Оценка времени пребывания топлива в топке для одной из типичных конструкций энергетических котлов в странах СНГ – ТП-100 – показала, что оно составляет порядка 3,3 с.

В качестве средней температуры факела выбрано значение 1820 К. Превышением температуры частицы над температурой факела для мелких частиц в первом приближении пренебрегаем. Значение константы скорости реакции горения углерода до углекислоты выбрано по опыту работы [3] для антрацита. Для температуры 1820 К оно составляет *k*=4,5 м/с.

Значение коэффициента диффузии кислорода в газообразной среде азота, углекислоты и водяных паров по опыту работы [3] принято на уровне 4,5·10<sup>-4</sup> м<sup>2</sup>/с.

Текущая доля несгоревшего углерода коксового остатка частиц в каждый момент времени определяется как отношение массы углерода коксового остатка всех еще не сгоревших частиц к исходной массе углерода коксового остатка в момент начала его горения:

$$G = \frac{\rho_k \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^n \chi_i \delta_i^3}{G_n},$$

где  $G_n$  – начальное значение массы углерода в 1 кг исходного топлива, кг;  $\chi_i$  – число частиц топлива  $i$ -й фракции с размером  $\delta_i$ , соответствующее 1 кг исходного топлива.

Численные эксперименты по исследованию выгорания полифракционной пыли проведены для условий котла ТП-100 одной из электростанций Донбасса.

Состав угля, поступающего на горелки котла, %:  $C^c=90$ ;  $H^p=4$ ;  $N^p=0,94$ ;  $O^c=4$ ;  $S^c=1,06$ ;  $A^c=19$ ;  $W^p=0,7$ .

Объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг угля заданного состава, и удельный выход продуктов сгорания в действительных условиях определены при помощи стандартных расчетных зависимостей, используемых в теории горения топлива [4]:  $V^0=7,367$  м<sup>3</sup>/кг,  $V_2=9,069$  м<sup>3</sup>/кг.

В первом приближении для расчета использованы данные ситового анализа пыли от пробы, отобранной после мельницы из раздаточного бункера (табл. 1).

Для каждой из четырех выделенных для рассмотрения фракций размер частиц принят как среднее арифметическое минимального и максимального размеров согласно соответствующему классу крупности. Выбранные средние размеры частиц использованы для задания начальных условий для каждого из дифференциальных уравнений, входящих в составленную систему. Также с учетом среднего принятого размера частиц и исходной плотности угля определено число частиц топлива в каждой фракции, приходящееся на 1 кг угля.

В результате проведения численного эксперимента получены кривые, описывающие изменение расчетного для каждой фракции размера частиц топлива (рис. 1).

Остаточное содержание углерода после завершения процесса горения составляет 0,61 %, а механический недожог  $q_4=0,739$  %.

Как видно из рис. 1, частицы 3-й и 4-й фракций успевают полностью выгореть в течение пребывания топлива в топке, а для 1-й и 2-й фракций углерод частиц не успевает полностью выгореть. При этом необходимо учесть, что массовая доля 1-й фракции составляет всего лишь 2,1 %, а для 2-й фракции она намного более существенна (11,9 %) и требует более глубокого рассмотрения.

Для иллюстрации влияния количества рассматриваемых классов крупности 2-я фракция условно разбита на три составляющие со средними размерами: 3-74 мкм, 4-95 мкм, 5-114 мкм и содержанием 4,4 и 3,9 %, что соответствует общей массовой доле частиц 2-й фракции – 11,9 %. Результаты моделирования выгорания топлива в этом случае представлены на рис. 2.

Табл. 1. Ситовый анализ пыли, отобранной из раздаточного бункера

| № п.п. | Класс крупности, мм | Массовая доля, % |
|--------|---------------------|------------------|
| 1      | 0,16-0,125          | 2,1              |
| 2      | 0,125-0,063         | 11,9             |
| 3      | 0,063-0,040         | 10,4             |
| 4      | 0,040-0             | 75,6             |
| Итого  | -                   | 100,0            |

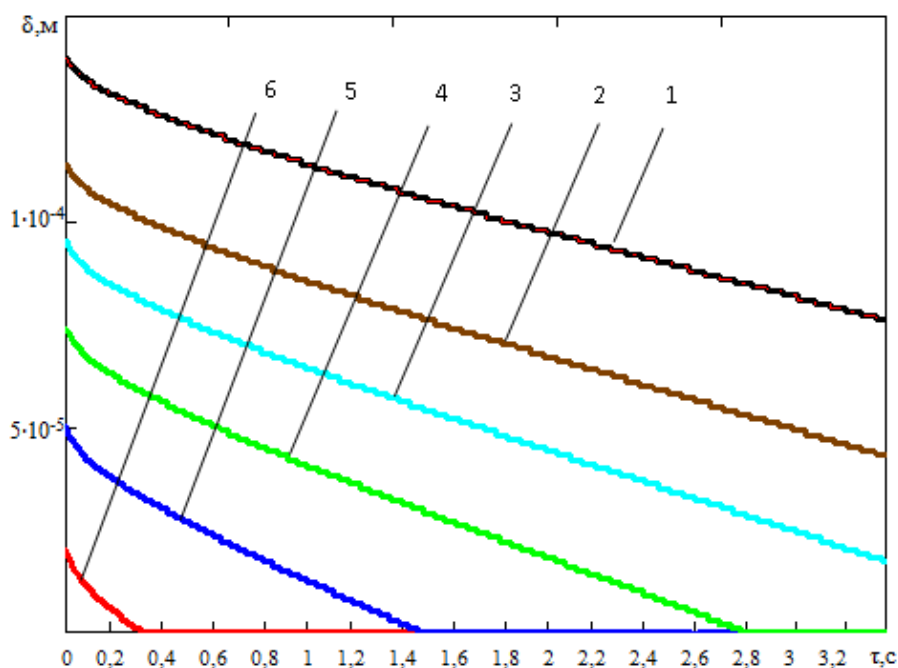


Рис. 1. Изменение размеров частиц выделенных для рассмотрения фракций в процессе сжигания ПУТ: 1 – исходный размер 140 мкм; 2 – 90 мкм; 3 – 50 мкм; 4 – 20 мкм

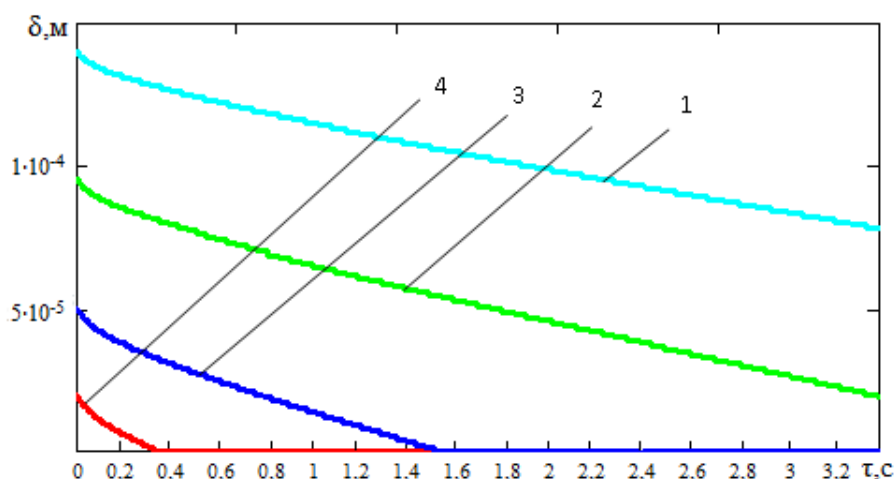


Рис. 2. Изменение размеров частиц при увеличенном количестве рассматриваемых фракций: 1 – исходный размер 140 мкм; 2 – 114 мкм; 3 – 95 мкм; 4 – 74 мкм; 5 – 50 мкм; 6 – 20 мкм

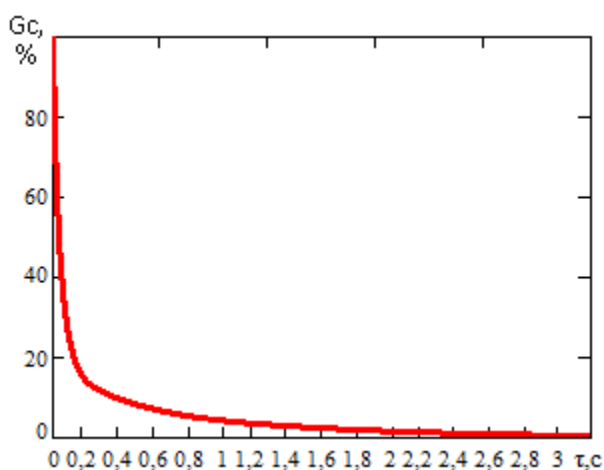
Остаточное содержание углерода после завершения процесса горения составляет 0,71 %, а механический недожог  $q_4=0,86$  %.

Таким образом, расчетное значение результирующего недожога при прочих равных условиях зависит от того, какое количество фракций выбрано для рассмотрения. Необходимо отметить, что в большинстве случаев реальная величина механического недожога оказывается несколько выше. Причина этого заключается в том, что частицы после попадания в топку должны претерпеть ряд физико-химических трансформаций: выделение и воспламенение летучих, прогрев частиц коксового остатка до воспламенения углерода.

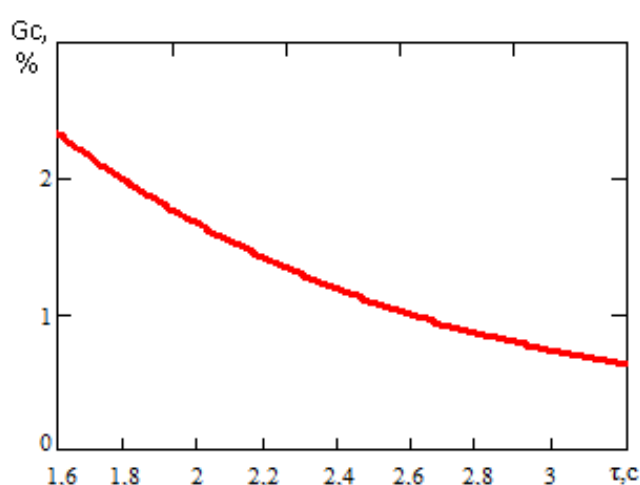
Для низкорреакционных топлив влияние летучих на процесс воспламенения частиц коксового остатка достаточно незначительно. Таким образом, процесс горения частиц для каждой из

рассматриваемых фракций, описываемый предложенной системой уравнений, начинается не с момента попадания частиц в топку, а через некоторое время задержки, которое уходит на прогрев и воспламенение частиц.

Естественно, для каждой из рассматриваемых фракций время задержки имеет свое значение: оно меньше для фракций меньшего размера и наоборот. По предварительным оценкам с использованием зависимостей для расчета нагрева термически тонких тел [5] и теории струйного движения, время задержки на нагрев наиболее крупных частиц до температуры воспламенения (порядка 800 °С) может составлять до 0,35 с. Учет времени задержки воспламенения частиц разных фракций позволит дополнительно повысить точность описания процесса выгорания частиц при помощи разработанной математической модели и упростить процесс ее адаптации



а



б

Рис. 3. Изменение содержания несгоревшего углерода в общей массе ПУТ, поступившей на сжигание в течение пребывания топлива в топочном пространстве:

а – для полного периода времени нахождения топлива в топке;

б – для завершающего этапа нахождения топлива в топке

на предварительном этапе.

В качестве дополнительных приемов для адаптации модели к конкретным условиям могут быть использованы приемы начальной или оперативной подстройки за счет коррекции значений константы скорости реакции окисления углерода или диффузионного критерия Нуссельта.

Характер изменения остаточного содержания углерода во времени для второго численного эксперимента представлен на рис 3.

Как видно из рис. 3, скорость выгорания углерода максимальна в начальном периоде пребывания частиц в топке и затем убывает. Эта закономерность объясняется снижением парциального давления кислорода по ходу факела в связи с его расходом на выгорание топлива. Тем не менее, из анализа информации на рис. 3б видно, что увеличение времени пребывания топлива в топке на 0,6 с позволило бы снизить недожог на 0,3 %.

Таким образом, способ снижения механического недожога, связанный с предварительной активацией низкорреакционного топлива, может быть убедительно обоснован при помощи полученных в данной работе результатов математического моделирования. Действительно, в результате предварительной активации топлива существенно сокращается время задержки на его воспламенение, что позволяет увеличить расчетное время пребывания частиц в топке. Особенно важным этот результат является для частиц крупных фракций.

#### Выводы

Разработана математическая модель выгорания полифракционного пылеугольного топлива в факеле, позволяющая одновременно учесть особенности выгорания каждой из фракций угольной пыли, определяемые ее средним размером, зольностью. Предложенная модель базируется на системе обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, описывающих изменение размера частиц каждой из выделенных для рассмотрения фракций.

**A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.)/, V.A. Semergey**  
Donetsk National Technical University (Donetsk)

Доказано существенное влияние количества выделенных для рассмотрения фракций на величину установленного при помощи математической модели механического недожога. Так, при проведении численного моделирования разделение фракции классом крупности 0,125-0,063 на три более узкие фракции с равномерным распределением массы частиц внутри них привело к росту расчетного значения величины механического недожога на 11 %.

Обосновано влияние учета времени задержки воспламенения частиц каждой из фракций на уточнение результатов определения величины механического недожога. Эта закономерность совместно с установленным характером изменения во времени доли несгоревшего углерода дополнительно поясняет сущность положительных результатов, достигаемых при предварительной активации низкорреакционного топлива.

#### Список литературы

1. Ranade, V.V. Computational Modeling of Pulverized Coal Fired Boilers / V.V. Ranade, D.F. Gupta. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 271 p.
2. Díez, L.I. Modelling of pulverized coal boilers: review and validation of on-line simulation techniques / L.I. Díez, C. Cortés, A. Campo // Applied Thermal Engineering. – 2005. – Vol.25, Issue 10. – P. 1516-1533.
3. Основы практической теории горения: учебное пособие для вузов / В.В. Померанцев [и др.]. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
4. Бирюков, А.Б. Сжигание и термическая переработка органических топлив / А.Б. Бирюков, И.П. Дробышевская, Ю.В. Рубан. – Донецк: Ноулидж, 2014. – 232 с.
5. Heat and mass transfer: Workbook for students of institutes and universities / S.I. Ginkul, V.V. Kravtsov, V.I. Sheludchenko, A.B. Birukov. – Donetsk: Nord-Press, 2006. – 291 p.

### MATHEMATICAL MODEL FOR PULVERIZED COAL BURNOUT IN THE FURNACE OF THE POWER BOILER

**Background.** For dealing with such challenges as the solid fuel burnout by its flaring the method of mathematical modeling is most preferred. On the basis of the model formulation, it is advisable to use a well-known recording of the differential equations of the 1<sup>st</sup> order describing the change of specific particles size. For taking into account the polyfractional feature of the flare, the simplified integral re-

lations are usually used. Their disadvantage is the necessity of selecting and using average values of quantities characterizing the process. Therefore, the aim of this paper is to create a mathematical model for burnout of the pulverized coal polyfractional flare, which allows considering the burnout feature of each fraction of the coal dust.

**Materials and/or methods.** To determine the auxiliary parameters (the time of presence of the particles in the furnace, the rate constant of the reaction of carbon combustion, the diffusion coefficient, etc.) the complete set of calculated dependencies is selected. The system of equations is solved numerically using the Runge-Kutta method. As a result of the numerical experiments for the given source data determined the nature of the change of particle size for each of the fractions and the contents change of residual carbon when the coal dust is in a furnace.

**Results.** When modeling the flare burnout of an anthracite dust presented by four fractions, mm: 0.16-0.125; 0.125-0.063; 0.063-0.04; 0.04-0, with the mass proportion of fractions, %: 2.1; 11.9; 10.4; 75.6 respectively, the residual carbon content after the combustion process is 0.61 %, and the mechanical underburning  $q_4=0.739$  %. When splitting a fraction of 0.125-0.63 mm into three narrower fractions with the uniform weight distribution of the particles within them, the estimated value of underburning increased by 11 % and was on the residual carbon content of 0.71 %, and the overall magnitude of mechanical underburning of 0.86 %.

**Conclusion.** The effect of the number of considered fractions on the value of mechanical underburning has been proven. The influence of the delay time of ignition of the particles of each fraction on clarifying the magnitude of mechanical underburning is substantiated. This pattern, together with the established character of the changes over time in the share of non-burnt carbon explains the essence of the positive results achieved by pre-activation of a low reactivity fuel.

**Keywords:** coal dust, power boiler, pulverized coal burnout, sieve analysis, unburned carbon proportion, mechanical underburning.

#### Сведения об авторах

##### А.Б. Бирюков

SPIN-код: 3186-0680;  
Scopus ID: 7006918782;  
ORCID ID: 0000-0002-8146-2017  
Телефон: +380 (50) 260-97-75  
Эл. почта: birukov.ttf@gmail.com

##### В.А. Семергей

Телефон: +380 (66) 189-60-57  
Эл. почта: semergey79@mail.ru

Статья поступила 31.03.2017 г.

© А.Б. Бирюков, В.А. Семергей, 2017

Рецензент д.х.н., проф. Л.Ф. Бутузова



#### Новинки Изд-ва «ДОНЕЦКАЯ ПОЛИТЕХНИКА»

*Кадровая политика и кадровый аудит: учеб. пос. / Е.А. Шумаева, О.А. Савельева. – Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2016. – 98 с. ISBN 978-966-8248-76-4*

Рассмотрены теоретические вопросы формирования и реализации кадровой политики на государственном, региональном и организационном уровне, основные направления и технологии кадровой политики, актуальность использования и анализа кадрового потенциала в кадровой политике организации, теоретико-методологические основы проведения кадрового аудита.

Особое внимание уделено формированию определенных навыков стратегической работы с персоналом, определения задач, возможностей и ограничений кадрового аудита, установления его связи с кадровой политикой с целью повышения эффективности системы управления в целом.